

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义

刘鑫¹, 向伟¹, 司炳成^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 萨斯喀彻温大学土壤学系, 加拿大萨斯卡通市 S7N5A8)

摘要: 汾河流域是黄河的第二大支流, 本文利用 Piper 三线图、Gibbs 模型、主成分分析法、相关矩阵和正向演替模型等方法, 分析了汾河流域浅层地下水的水化学和氢氧稳定同位素分布特征及其控制因素, 揭示了流域水循环及水质演化过程。结果表明, 汾河流域地下水属弱碱性和微硬水; 优势阴阳离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ; 地下水水化学类型以 Mg-Ca-HCO_3 和 Mg-Ca-Cl-SO_4 为主, 水质整体较好, I ~ III 类水占比超 94%。地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -70.2‰ 和 -9.6‰ , 与 7 ~ 9 月降水同位素值相似, 指示地下水可能主要来源于该时期的降水, 并发现地下水补给方式 (优势流和活塞流) 存在一定的空间变化。岩石风化是地下水溶质的主要来源 (87%), 而大气输入和人类活动相对较小, 分别占 8% 和 5%。在岩石风化中, 硅酸盐岩、蒸发盐岩和碳酸盐岩对地下水溶质的贡献相当, 分别占 32%、28% 和 26%。本研究结果可为促进可持续开发利用汾河流域地下水资源提供依据。

关键词: 水化学; 氢氧稳定同位素; 黄河流域; 黄土高原; 地下水; 汾河

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1739-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008315

Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance

LIU Xin¹, XIANG Wei¹, SI Bing-cheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Department of Soil Science, University of Saskatoon, SK S7N 5A8, Canada)

Abstract: The Fenhe River basin is the second largest tributary of the Yellow River. Piper diagrams, Gibbs, PCA, correlation analysis and forward derivation modeling were used to analyze the distribution characteristics and the controlling factors of the groundwater chemistry and stable isotopes in the Fenhe River basin, which revealed the water cycle and water quality evolution process. The results indicated that the groundwater is a weakly alkaline, micro-hard water, the dominant anions and cations are HCO_3^- and Ca^{2+} , the major groundwater types are Mg-Ca-HCO_3 and Mg-Ca-Cl-SO_4 , the groundwater quality is good, and more than 94% of the samples belong to classes I - III. The average values of δD and $\delta^{18}\text{O}$ of the Fenhe River groundwater are -70.2‰ and -9.6‰ , which are similar to the isotope values of the precipitation from July to September, indicating that the groundwater may have originated from this period and that the groundwater recharge mode (dominant flow and piston flow) has a spatial variation. Rock weathering is the dominant source of ions in the groundwater, with an average contribution of 87%, while the contributions of atmospheric input and human activity are 8% and 5%, respectively. For rock weathering, silicate, evaporate, and carbonate rock contribute equally to the groundwater solutes, accounting for 32%, 28%, and 26%, respectively. The results of this study provide the basis for promoting the sustainable development and utilization of groundwater resources in the Fenhe River basin.

Key words: hydrochemistry; stable isotopes; Yellow River; Chinese Loess Plateau; groundwater; Fenhe River

汾河是黄河流域的第二大支流, 位于我国北方生态环境极为脆弱的黄土高原, 同时又是山西省乃至我国重要的化工能源基地^[1]。受降水稀少、蒸散发大、水土流失严重和人类活动强烈等因素的影响, 黄土高原已成为我国水资源供需矛盾极为突出的地区之一^[2]。地下水是黄土高原生活、工农业生产和生态系统需水的重要水资源^[3,4], 然而近年来在部分地区呈现出地下水位下降^[5]、地表径流减少^[2]和水质退化^[6]等一系列水环境问题, 在一定程度上加剧了区域水资源危机。在此背景下, 黄土高原地下水补给方式及水质演化备受关

注, 已成为该区域水资源

可持续利用与开发管理的研究重点和热点^[7,8]。地下水补给是一个十分复杂的生态水文过程, 受大气、土壤、植被及人类活动等多因素的影响^[9]。利用氢氧稳定同位素 (δD 和 $\delta^{18}\text{O}$) 结合水化学技术是地下水补给及水质演化的一种有效示踪方法^[10]。氢氧稳定同位素可以揭示不同水体的补给来源及相互转化关系^[11,12]。例如, Xiang 等^[11]利用稳定同位

收稿日期: 2020-08-31; 修订日期: 2020-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877017, 41630860); 西北农林科技大学基本科研业务费 (2452017317)

作者简介: 刘鑫 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文, E-mail: Liuxin213@nwfu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: bing.si@usask.ca

素揭示了活塞流是黄土高原长武地区的主要补给机制. Li 等^[12]通过分析地下水与地表水的氢氧同位素特征发现,黄土高原地区地下水主要接受 7~9 月雨季降水补给. 水化学特征记录了流域气候^[6]、土壤及岩性^[13]、植被覆盖^[14]和人类活动^[15]等因素对水循环过程的影响,其结果可以对氢氧稳定同位素示踪进行补充;同时通过溶质质量守恒原理可以定量分析大气输入、人类活动及岩石风化对水文过程的影响^[16,17]. 例如, Li 等^[16]利用水化学及同位素特征探究银川地区地下水水化学演化过程及控制因素. Zhao 等^[17]利用水化学及同位素特征研究杭州湾新区地下水时空演化特征,并对其形成机制与更新能力进行评价. 因此,结合氢氧稳定同位素和水化学特征对于理解水文地球过程和保护生态环境具有重要指示意义.

在黄土高原,诸多研究分析了 6 个典型流域(渭河、泾河、洛河、延河、窟野河和无定河)的地下水水化学特征^[15,18,19],少数研究利用氢氧稳定同位素技术揭示了黄土塬区^[20]、黄土丘陵区^[21]和 5 条典型河流(渭河、泾河、洛河、延河和无定河)地下水补给来源与方式,但缺乏对汾河流域地下水同位素和化学风化地球化学循环过程系统的研究. 为更全面和充分地认识黄土高原地下水补给方式和水质演化过程,本研究通过对汾河流域浅层地下水的水化学和氢氧稳定同位素进行测定,分析地下水水化学和氢氧稳定同位素的分布特征及控制因素,揭示汾河流域地下水补给方式和水质演化及影响因素,以期为促进可持续开发利用汾河流域地下水资源提供依据,并服务于黄土高原乃至黄河流域水资源可持续管理.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

汾河流域位于东经 $110^{\circ}30' \sim 113^{\circ}32'$, 北纬 $35^{\circ}20' \sim 39^{\circ}00'$ (图 1), 是山西省最大的河流, 也是黄河第二大支流, 沿岸每年从汾河取各类水资源 24.3 亿 m^3 , 占全省水资源利用总量的 46%^[22]. 流域东西宽 188 km, 南北长 412.5 km, 干流全长 694 km, 流域面积 $3.94 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省面积的 25.5%, 黄河流域的 6.2%^[23,24]. 汾河流域位于山西省中部, 主要由东部的太行山区, 中部的太原盆地和西部的吕梁山区构成, 总体地势呈北高南低, 四周高中间低^[23], 地层总体向东南方向倾斜, 其中古生界碳酸盐岩构成泉域岩溶地下水含水层^[25]. 本研究以太原北郊区上兰村和洪洞县石滩为界限, 将汾河流域分为上中下游三段^[23]. 此外, 汾河流域属温带大陆性

季风气候, 为半干旱、半湿润气候过渡区, 气候变化明显. 全流域多年 (1956~2000 年) 平均降水量为 504.8 mm, 水面蒸发量介于 $1\,000 \sim 1\,200 \text{ mm}$ ^[24,26].

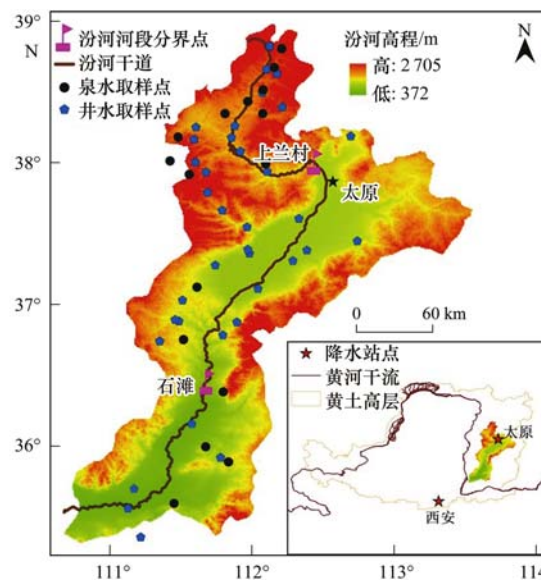


图 1 研究区地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Geographical location of the study area and the distribution of the sampling sites

1.2 样品采集与测定

2019 年 9 月 25~29 日, 在汾河流域共收集到 55 个浅层地下水水样 (浅层指埋藏较浅, 未经深层岩石过滤, 直接受大气降水和地表水补给的潜水), 主要为泉水 (16 个) 和埋深较浅的 (井深大多在 30 m 以内) 居民饮用水井水 (39 个), 具体采样点分布状况如图 1 所示. 在地下水取样点选择时, 首先进行详细地调查以确保地下水水样为浅层地下水, 同时排除有其他水源污染的情况 (例如, 灌溉和生活污水等). 泉水样点的采样直接于泉眼出露位置进行, 井水样点首先利用电动水泵抽水 10 min 以上, 排出前期滞留在水井中的水以确保所取井水样为新鲜的地下水. 在每个地下水取样点取样前, 将性质稳定、耐酸碱腐蚀的 250 mL 聚乙烯样品瓶充分涮洗 2~3 次, 取样后立即密封瓶口, 避免水样泄漏或被污染, 并尽快将样品带回室内 4°C 冷藏.

地下水 pH、氧化还原电位 (ORP) 和总固体溶解量 (TDS) 测定分别使用梅特勒-托莱德 pH 和 TDS 计; 地下水 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 测定采用离子色谱仪 (USA, ThermoFisher Scientific, ICS-1100), 精度为 $20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 地下水 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 采用酸碱平衡法测定; 地下水 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 的测定采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (USA, ThermoFisher Scientific, ICAP6300), 精度为 $20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 采用液态水同位素分析仪 (IWA-45EP,

LGR, USA) 测定, 测量精度分别为 1‰和 0.2‰, 测量结果以维也纳标准平均海水 (VSMOW) 为标准的千分差[δ(‰)]表示. 以上所有实验分析均在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院进行.

1.3 数据分析

1.3.1 地下水补给来源

地下水 lc-excess 值可以反映其在补给过程中经历的蒸发及非平衡分馏程度^[27,28], 通过以下公式计算:

lc-excess = δD - aδ¹⁸O - b (1)

式中, a 和 b 分别为当地大气降水线 (LMWL) 的斜率和截距. lc-excess 表示由蒸发导致的地下水同位素偏离 LMWL 的程度, 一般认为降水的 lc-excess 为 0, 其值越小说明地下水受到的蒸发程度就越强烈^[29].

1.3.2 地下水离子来源

首先利用 Piper 图分析地下水的水化学类型^[30], 利用相关性分析揭示地下水中各离子间的相关关系^[31], 利用主成分分析法筛选出影响地下水水化学组成的主要变量^[32]. 其次, 利用 Gibbs 模型定性判断地下水水化学组成的来源, 包括蒸发结晶、岩石风化和大气输入^[33], 并利用指标 1 (指标 1 = Ca²⁺ + Mg²⁺ - HCO₃⁻ - SO₄²⁻) 与指标 2 (指标 2 = Na⁺ - Cl⁻) 的相关比值判断是否发生阳离子交替吸附作用^[34]. 最后, 利用正向演替模型进一步量化大气输入、人类活动和岩石风化 (碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩) 对地下水水化学组成的相对贡献^[35], 主要等式如下:

大气输入 =
$$\frac{Na^{+}_{大气输入} + K^{+}_{大气输入} + Ca^{2+}_{大气输入} + Mg^{2+}_{大气输入}}{\sum 阳离子_{地下水}}$$
 (2)

碳酸盐岩 =
$$\frac{2(Ca^{2+}_{碳酸盐岩} + Mg^{2+}_{碳酸盐岩})}{\sum 阳离子_{地下水}}$$
 (3)

硅酸盐岩 =
$$\frac{Na^{+}_{硅酸盐岩} + K^{+}_{硅酸盐岩} + Ca^{2+}_{硅酸盐岩} + Mg^{2+}_{硅酸盐岩}}{\sum 阳离子_{地下水}}$$
 (4)

蒸发盐岩 =
$$\frac{Na^{+}_{蒸发盐岩} + SO^{2-}_{4蒸发盐岩}}{\sum 阳离子_{地下水}} + \frac{Ca^{2+}_{蒸发盐岩} + Mg^{2+}_{蒸发盐岩} + Cl^{-}_{蒸发盐岩}}{\sum 阳离子_{地下水}}$$
 (5)

人类活动 =
$$NO^{-}_{3人类活动} / \sum 阳离子_{地下水}$$
 (6)

式中, 人类活动和岩石风化中各离子组成利用元素 X (K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 Cl⁻) 的质量守恒进行计算:

X_{地下水} = V_{大气输入} + X_{人类活动} + X_{碳酸盐岩} + X_{硅酸盐岩} + X_{蒸发盐岩} (7)

本研究中大气输入的离子组成采用汾河流域附近龙门和头道拐两个站点的数据^[36]. 由于地下水氯浓度的最低值 (0.124 mmol·L⁻¹) 明显高于经蒸发修正后^[37]的大气输入的氯浓度 (0.060 mmol·L⁻¹), 采用公式 (8) 对地下水中各离子浓度进行修正:

X_{地下水}^{*} = X_{地下水} - X_{大气输入} (8)

式中, X_{大气输入}、X_{地下水} 和 X_{地下水}^{*} 分别表示大气输入、修正前和修正后的地下水离子浓度, mmol·L⁻¹.

1.3.3 地下水水质评价

本研究根据《地下水质量标准》GB/T 14848-2017, 按照饮用水标准, 采用以离子类型和化学参数为基础的 WQI 法对流域地下水水质进行评价:

W_i = w_i /
$$\sum w_i$$
 (9)

WQI =
$$\sum \left[W_i \times \left(\frac{c_i}{S_i} \right) \times 100 \right]$$
 (10)

式中, w_i 表示元素的权重, 其依据污染物对人体健康影响程度取值介于 1~5^[38]; $\sum w_i$ 表示元素的权重之和; W_i 表示元素权重的相对比例; c_i 表示测定的元素浓度^[39]; S_i 表示世界卫生组织 WHO 的离子浓度标准^[39,40]. 根据 WQI 值将水质分为 5 类^[6,40]: I 类水 (WQI < 50)、II 类水 (50 ≤ WQI < 100)、III 类水 (100 ≤ WQI < 200)、IV 类水 (200 ≤ WQI < 300) 和 V 类水 (WQI ≥ 300).

表 1 WQI 法中不同离子的 w_i、W_i 和 S_i 参数

Table 1 Parameter value of w_i, W_i, and S_i for different ions in the WQI method

参数	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺ + Na ⁺	Mg ²⁺	pH	TDS	EC
w _i	4	3	5	3	3	2	3	3	5	4
W _i	0.114 3	0.085 7	0.142 9	0.085 7	0.085 7	0.057 1	0.085 7	0.085 7	0.142 9	0.114 3
S _i	250	250	20	500	200	200	150	8.5	1 000	1 500

2 结果与讨论

2.1 地下水基本理化性质

汾河流域地下水 pH 和硬度 TH 值 (钙镁毫克当

量总数乘以 50) 均未呈现明显的地带性空间分布规律 [图 2(a) 和图 2(c)]. 流域地下水整体上呈弱碱性, pH 介于 7.16~8.24, 平均值为 7.63; 硬度 TH 介于 85.7~1 754.3 mg·L⁻¹, 平均值为 320.8

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2); TDS 介于 $265\sim1\,800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $680\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中下游的地下水 TDS 最低明显大于上游 [图 2(b)]. 根据水硬度类型划分, 汾河流域地下水主要以微硬水为主 ($\text{TH}>150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 占比 81.8%. 利用 WQI 法对地下水水质进行评价, 结果显示流域内 I~V 类水质分别占

比 25%、53%、16%、4% 和 2%, I~III 类水质占比超 94%, 表明汾河流域地下水水质整体上状况良好, 同时不难发现, 汾河流域上游的地下水水质好于中游和下游 [图 2(d)], 原因是中下游属于人口聚居的盆地地区, 其地下水较上游更易受到人类活动的影响^[41].

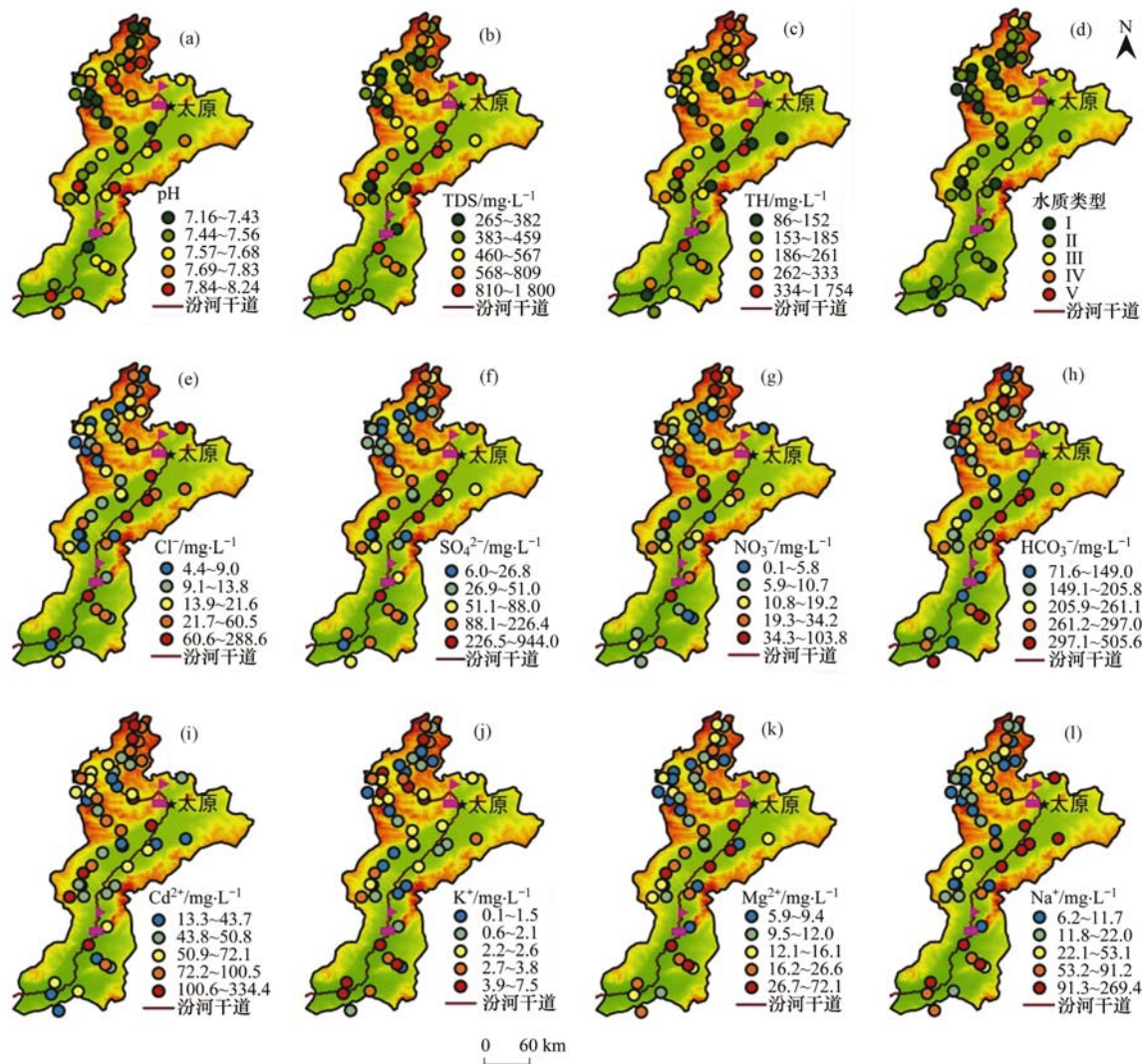


图 2 汾河流域浅层地下水化学参数及主要离子的空间分布

Fig. 2 Spatial variations of the chemical parameters and major ions of the shallow groundwater in the Fenhe River Basin

表 2 汾河流域浅层地下水基本理化性质、稳定同位素和水化学组成统计特征

Table 2 Analytical results of the groundwater parameters, isotope, and chemistry in the Fenhe River basin														
项目	pH	TDS	TH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	δD	δ ¹⁸ O	lc-excess
		/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/‰	/‰	/‰
最小值	7.16	265	85.7	4.4	6	0.1	71.6	13.3	0.1	5.9	6.2	-85.4	-11.4	-8.8
最大值	8.24	1 800	1 754.3	288.6	944	103.8	505.6	334.4	7.5	72.1	269.4	-62.7	-8.3	2.3
平均值	7.63	680	320.8	37.8	161.3	23.7	233.6	82.7	2.7	21	60.6	-70.2	-9.6	-5.1
标准偏差	0.23	424.5	306.2	51.4	230.1	26.5	95.2	69.8	1.6	17.5	65.7	4.6	0.8	2.4

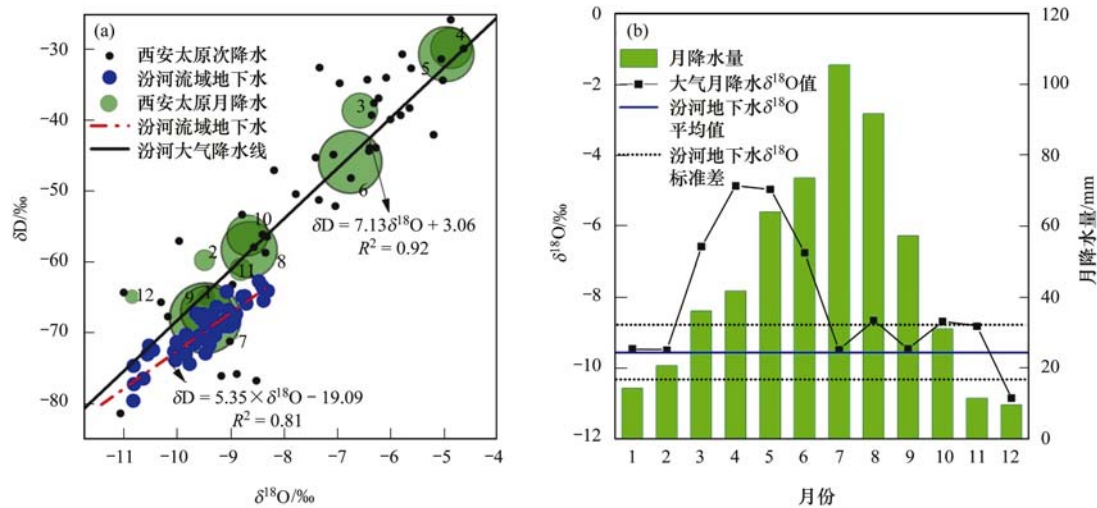
2.2 地下水氢氧稳定同位素特征

黄土高原降水量及氢氧稳定同位素组成呈现明显的季节性变化^[42], 为利用同位素技术分析地下水补给来源提供了基础. 为分析汾河流域地下水的补

给来源, 本研究从国际原子能机构获得位于汾河流域及邻近地区两个观测站长期的月尺度大气降水同位素数据 (西安, $N=48$; 太原, $N=20$). 结果表明, 汾河流域月降水氢氧稳定同位素值变化较大, δD 和

$\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别为 $-88.8\text{‰} \sim -23.3\text{‰}$ 和 $-13.2\text{‰} \sim -1.2\text{‰}$, 算术平均值分别为 -54.3‰ 和 -7.7‰ , 雨量加权平均值分别为 -52.8‰ 和 -7.8‰ . 进一步按月份进行雨量加权平均, δD 和

$\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别为 $-67.9\text{‰} \sim -29.8\text{‰}$ 和 $-10.8\text{‰} \sim -4.9\text{‰}$; 整体上看, 月加权平均同位素值呈现明显的季节变化(图 3), 7 月~次年 2 月同位素值相对贫化, 而 3~6 月同位素值相对富集.



(a) 汾河流域浅层地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值关系(数字代表月份, 圆圈半径大小代表月降雨量相对大小); (b) 汾河流域降水量和同位素的空间变化

图 3 汾河流域大气降水和浅层地下水氢氧稳定同位素关系

Fig. 3 Stable isotopes relationship between the atmospheric precipitation and shallow groundwater in the Fenhe River basin

汾河流域地下水氢氧稳定同位素值的变化范围明显小于降水(图 3). 从图 3 可以看出, 汾河流域地下水氢氧稳定同位素值与 3~6 月大气降水同位素值差异较大, 而主要与 7 月~次年 2 月的大气降水同位素值相似. 由于在 7 月~次年 2 月时期内降水主要发生在 7~9 月, 占 78%, 据此可以推断汾河流域浅层地下水主要来源于 7~9 月的降水, 这与黄土高原的长武黄土塬区^[43]、洛川黄土塬区^[20]、陇东丘陵山区^[44]、榆林子洲岔巴沟流域^[45]和几条典型河流(渭河、泾河、洛河、延河和无定河)^[12]的研究结果一致. 汾河流域受大陆性季风气候的影响, 降水年内分布不均, 约占全年 50% 以上的降水集中在 7~9

月, 且多为强降水或持续性降水, 为降水补给地下水创造了有利气象条件^[12, 46]. 由图 4(a) 可知, 汾河流域浅层地下水 δD 由上游到中游呈现出由富集到贫化的趋势特征, 这与汾河流域浅层地下水的径流特征一致^[23].

根据西安和太原两个站点的大气降水氢氧稳定同位素数据, 回归拟合得到汾河流域的大气降水线方程(LMWL): $\delta\text{D} = 7.13\delta^{18}\text{O} + 3.06$, $R^2 = 0.92$ [图 3(a)]. 该方程的斜率小于中国大气降水线方程^[47]和全球大气降水线方程^[48]的斜率, 是因为汾河流域地处我国西北内陆腹地, 大气水汽在运移过程中发生了非平衡分馏作用. 汾河流域地下水同位素值仅

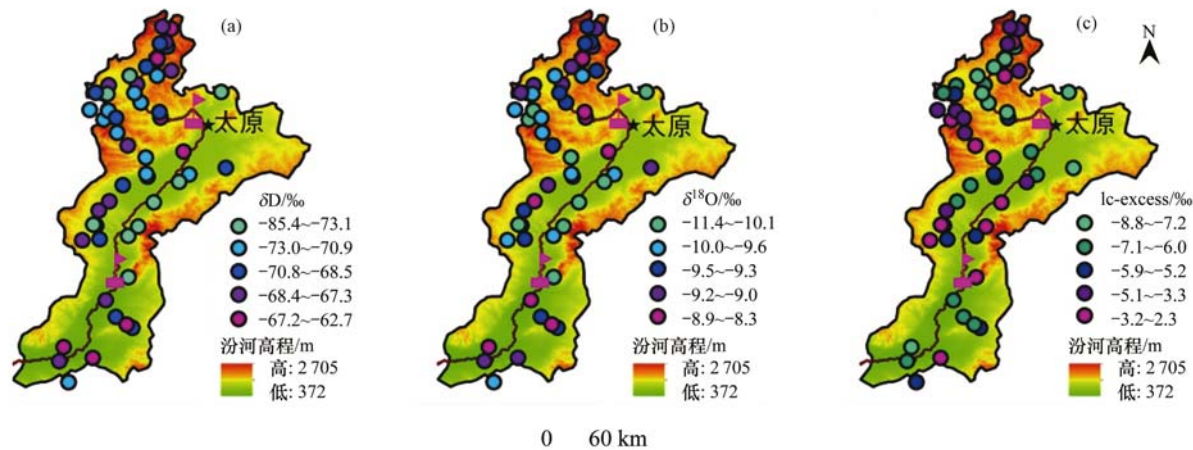


图 4 汾河流域浅层地下水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 lc-excess 空间分布

Fig. 4 Distributions of δD , $\delta^{18}\text{O}$, and lc-excess values of the shallow groundwater in the Fenhe River basin

仅分布于 LMWL 右下方,呈明显的线性变化($\delta D = 5.35\delta^{18}O - 19.09$, $R^2 = 0.81$),且大部分地下水 lc-excess 值明显小于降水(lc-excess = 0‰),表明地下水在补给过程中经历了蒸发分馏作用.降水向地下水转化过程中地下水补给受大气、土壤、植被及人类活动等多种因素的影响,补给路径或方式变得十分复杂,但通常可以简化为两个过程^[11]:活塞流,降水通过土壤非饱和区缓慢地入渗补给地下水;优势流,降水通过土壤非饱和区(例如,大孔隙和裂隙)或低洼地区等优势通道快速到达含水层补给地下水.从同位素角度出发,以活塞流方式补给地下水的水分会因为经历土壤蒸发而具有明显的同位素分馏特征,而优势流通常不具有同位素分馏特征^[49].因此,本研究中大部分地下水保留有明显的同位素分馏特征,表明活塞流是汾河流域地下水补给方式之一.然而,地下水 lc-excess 表示的蒸发分馏特征在整个流域内存在较大变化,且在部分样点同位素蒸发分馏特征不明显,意味着地下水以降水快速入渗补给为主,这可能与局部地区的微地形及地貌条件有关^[49].

2.3 地下水离子来源及控制因素

地下水阴离子浓度高低呈现: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$,阴离子 HCO_3^- 占地下水阴离子总量的 51%;阳离子浓度高低呈现: $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$,阳离子 Ca^{2+} 占地下水阳离子总量的 49%,表明 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为溶质离子的优势离子,这与泾河^[18]及黄河干流^[50]的观测结果一致(表 2).由于地下水中 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩风化^[51],而其在阴离子中占主导地位,表明碳酸盐岩石风化是地下水溶质的重要来源之一.根据 Piper 图显示,汾河流域地下水水化学类型主要有 Mg-Ca- HCO_3 和 Mg-Ca- $Cl-SO_4$ 两种,分别占取样总数的 51% 和 27% (图 5),地下水类型由上游山区的 Mg-Ca- HCO_3 型逐渐向中下游盆地中心的 Na-K- HCO_3 型转变且伴随着 TDS

逐渐增大,同时优势阳离子由 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 逐渐转变为 Na^+ ,原因在于地下水由山区进入盆地后蒸发作用增强,径流变缓,引起盐分不断地积累,使得钙镁矿物沉淀析出等一系列水岩作用引起水中的 Na^+ 富集.值得注意的是,地下水样点在 Piper 图中位置较为分散,表明地下水的水化学成分、含量变化较大,易受外界因素的影响.

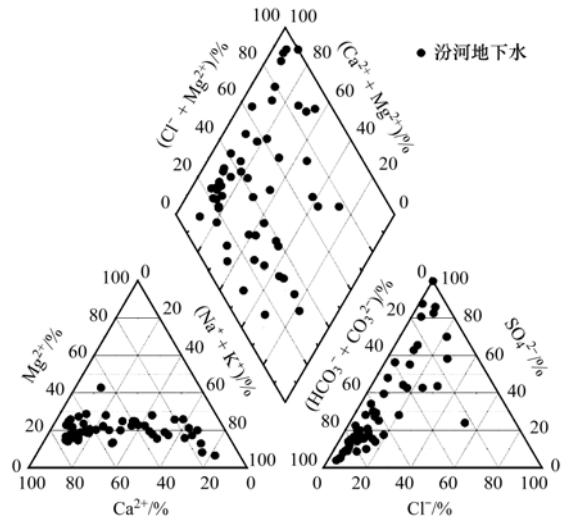


图 5 汾河流域浅层地下水 Piper 三线图

Fig. 5 Ternary diagrams for ions of the shallow groundwater in the Fenhe River basin

对汾河流域地下水中水化学组成及参数做相关性分析以及主成分分析,结果见表 3 和表 4. pH 与 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 均具有极显著的相关性($r > 0.6$, $P < 0.01$); TDS 与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均具有极显著的相关性($r > 0.6$, $P < 0.01$); WQI 与 NO_3^- 和 Ca^{2+} 均具有极显著的相关性($r > 0.6$, $P < 0.01$).以上结果说明,影响 pH、TDS 和 WQI 的主要水化学离子不同.此外,地下水各离子之间: Cl^- 与 Na^+ 具有极显著的相关性($r > 0.6$, $P < 0.01$),且主成分分析显示来源相同(21.45%),表明这两种离子可能的来源为蒸发盐岩风化^[52],然而 Cl^- 与 Na^+ 的比值为

表 3 汾河流域地下水水化学参数间的线性相关矩阵¹⁾

Table 3 Correlations matrix between the groundwater hydrochemical parameters in the Fenhe River basin

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	pH	TDS	WQI
Cl ⁻	1	0.417 **	0.255	0.053	0.196	0.197	0.500 **	0.768 **	-0.117	0.690 **	0.553 **
SO ₄ ²⁻		1	0.582 **	-0.285 *	0.894 **	0.102	0.933 **	0.254	-0.384 **	0.910 **	0.345 **
NO ₃ ⁻			1	-0.292 *	0.696 **	0.044	0.580 **	-0.059	-0.372 **	0.597 **	0.850 **
HCO ₃ ⁻				1	-0.351 **	0.152	-0.068	0.471 **	0.281 *	-0.032	-0.088
Ca ²⁺					1	0.052	0.794 **	-0.117	-0.458 **	0.746 **	0.615 **
K ⁺						1	0.125	0.192	-0.118	0.152	0.070
Mg ²⁺							1	0.377 **	-0.827 **	0.950 **	0.331 *
Na ⁺								1	0.085	0.541 **	0.280 *
pH									1	-0.328 *	0.082
TDS										1	0.828 **
WQI											1

1) *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$

表 4 主成分分析对主要离子的因子荷载¹⁾
Table 4 Factor loading of the principal component analysis for major ions

项目	PC1	PC2	PC3
Cl ⁻	-0.08	0.88	0.29
SO ₄ ²⁻	0.89	0.19	0.36
NO ₃ ⁻	-0.03	0.00	0.91
Ca ²⁺	0.65	-0.02	0.71
K ⁺	0.33	0.36	-0.15
Mg ²⁺	0.88	0.25	0.33
Na ⁺	0.06	0.95	-0.07
特征值	4.99	2.15	1.41
方差百分比/%	49.91	21.45	14.12
累积方差/%	49.91	71.36	85.48

1) 黑体字表示高荷载

1:2.6,说明除了大气降水以及蒸发盐岩风化以外还有其他的来源. SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 两两之间具有极显著的相关性($r>0.6, P<0.01$),且主成分分析显示具有相同的来源(49.91%),表明这3种离子可能的来源为硅酸盐和蒸发盐岩风化^[20]. NO_3^- 与 Ca^{2+} 具有极显著的相关性($r>0.6, P<0.01$),且具有相同的来源(14.12%),表明除岩石风化外,地下水中离子浓度可能还受到人类活动的影响^[53].

由图6可知,大部分地下水样点位于岩石风化范围内,表明岩石风化是汾河流域地下水中水化学组成的主要来源.然而,地下水 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值变化较大(0.076~0.878),说明受到了其他因素的影响^[54].此外,部分地下水样点落在三角区外,表明水化学组成可能受到了人类活动的影响.地下水指标1($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$)与指标2

($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$)存在明显的负相关关系(指标1 = $-1.08 \times \text{指标2} + 0.39, R^2 = 0.96$).其中,斜率接近-1^[55],表明在地下水运移过程中发生了阳离子交替吸附作用,岩石通过与地下水作用,用 Na^+ 置换地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,导致 Na^+ 富集.

进一步利用正向演替模型量化大气输入、人类活动和岩石风化(碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩)对地下水水化学组成的相对贡献(图7和表5).结果表明,大气输入、人类活动和岩石风化的相对贡献平均值分别为 $8\% \pm 4\%$ 、 $5\% \pm 6\%$ 和 $87\% \pm 7\%$,说明岩石风化是汾河流域地下水溶质的主要来源,与黄土高原其余6条主要河流,包括渭河^[15]、泾河^[20]、洛河、无定河、延河和窟野河^[19]的研究结论一致.此外,汾河流域地下水硅酸盐岩、蒸发盐岩和碳酸盐岩的贡献平均值分别为 $32\% \pm 28\%$ 、 $28\% \pm 26\%$ 和 $26\% \pm 29\%$,说明3种盐岩风化对地下水溶质的贡献相当.前人研究结果显示,渭河、洛河和窟野河的盐岩风化主要以蒸发盐岩为主^[15,52],泾河的盐岩风化主要以碳酸盐岩为主^[20],无定河和延河的盐岩风化与汾河流域类似,3种盐岩风化对地下水溶质贡献相当^[19].以上结果说明,黄土高原主要几条河流地下水溶质主要来源存在一定的空间差异.已有研究表明,流域气候^[6]、土壤及岩性^[13]、植被覆盖^[14]和人类活动^[15]等因素会对地下水溶质来源造成影响.例如,Xiao等^[6]利用微量元素表明干旱气候和人类活动是造成在黄土高原地表水水质退化的重要原因.

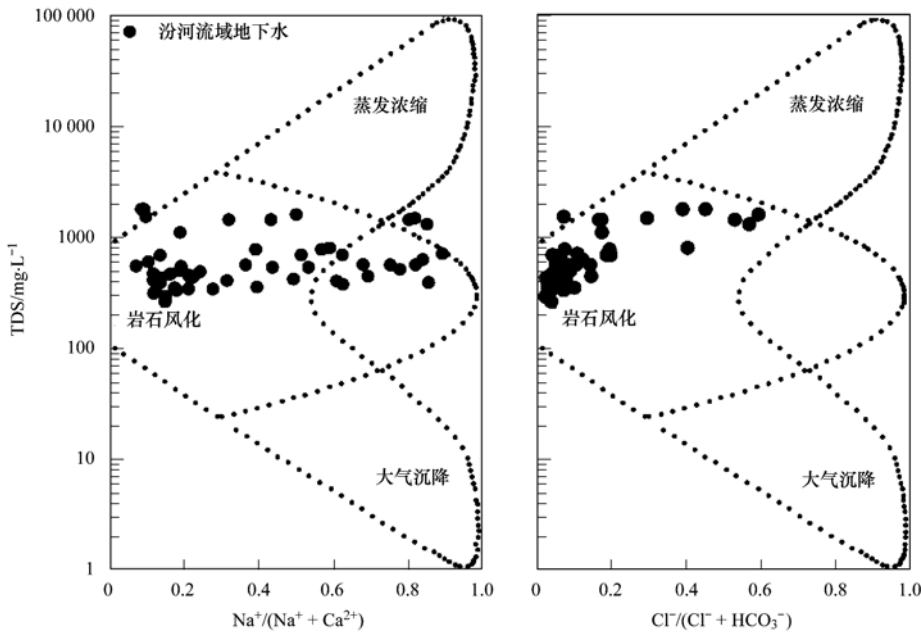


图 6 汾河流域浅层地下水 Gibbs 图

Fig. 6 Gibbs diagram of the shallow groundwater in the Fenhe River basin

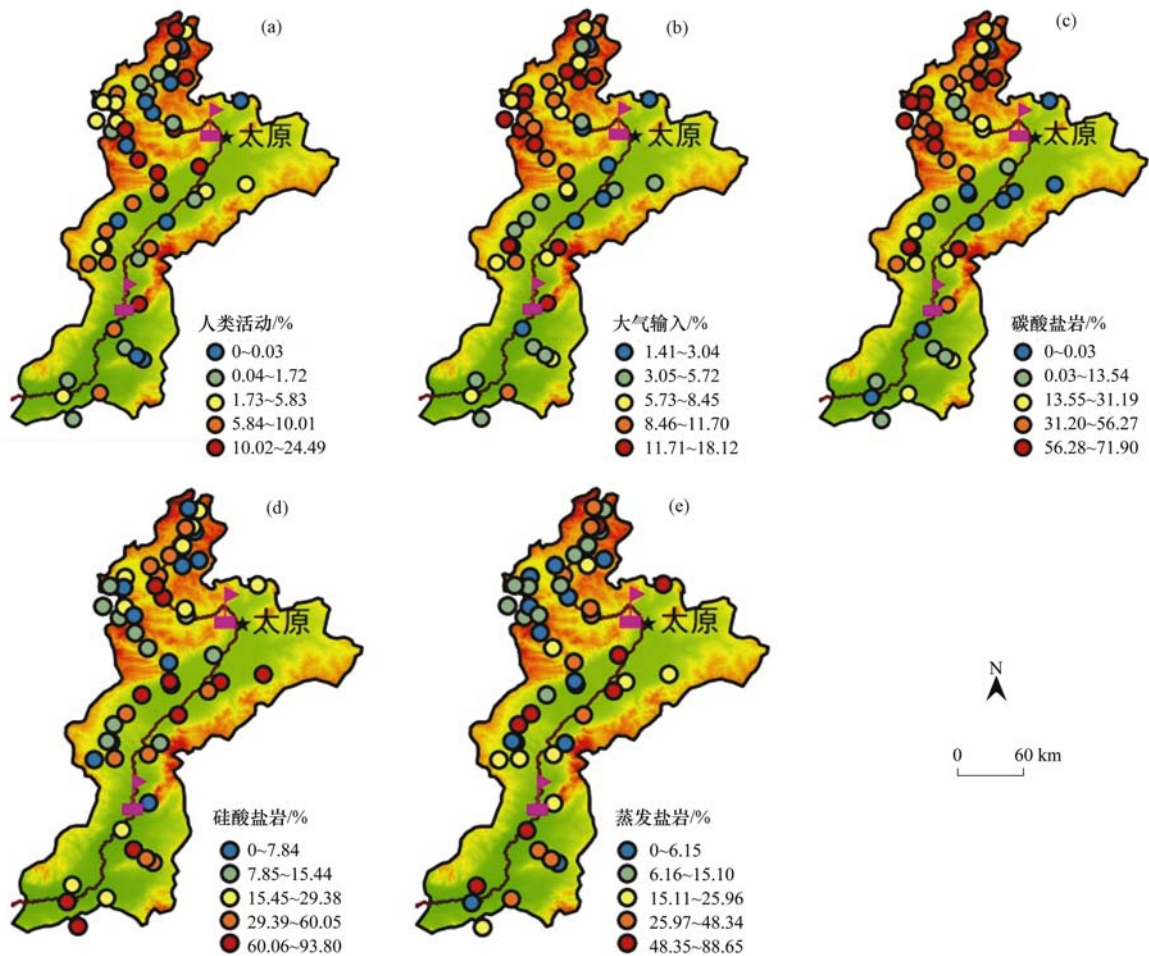


图7 汾河流域浅层地下水溶质输入贡献值空间分布

Fig. 7 Spatial variations of the solute contributions of the shallow groundwater in the Fenhe River Basin

表5 黄土高原几条主要河流浅层地下水水化学组成的来源比较

Table 5 Comparison of the shallow groundwater hydrochemistry in several major rivers in the Loess Plateau							
流域	大气输入/%	人类活动/%	岩石风化/%			文献	
			总计	蒸发盐岩	硅酸盐岩		碳酸盐岩
汾河	8	5	87	28	32	26	本研究
渭河	3	7	90	49	13	27	[15]
泾河	6	6	88	25	22	42	[20]
洛河	6	5	88	49	10	30	[19]
无定河	8	6	86	33	21	32	[19]
延河	3	6	91	26	30	35	[19]
窟野河	8	8	84	48	15	20	[19]

因此,需要进一步分析造成上述差异的原因及控制因子,以更全面和充分地认识黄土高原地下水水质分布特征.

此外,尽管大气输入及人类活动对汾河流域地下水的溶质贡献较小,且地下水水质整体状况较好[图2(d)],但大部分取样点的地下水 NO_3^- 浓度较高[图2(g)],且远超WHO饮用水推荐值($20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).一般自然状态下 NO_3^- 的环境本底浓度较低,而造成 NO_3^- 浓度升高的原因可能有生活污水、粪便、农业化肥^[15,56,57]和工矿活动^[53].在黄土高原,

Li等^[15]利用硝酸根氮氧同位素表明,农业活动中化肥施用是造成渭河流域地表水汛期和枯水期水质退化的重要原因.Xing等^[56]利用硝酸根双同位素发现泾河流域地表水水质状况可能与城市、工业及农业空间分布格局有关.汾河流域是山西省农业发达的主要地区,农业产值占全省的64%,随着化肥的大量施用,农业面源污染很可能是引起地下水中硝酸盐含量超标的重要原因.例如,Meng等^[57]研究了汾河流域下游地表水 NO_3^- 状况,并证实了农业化肥是造成 NO_3^- 浓度较高的主要原因.本研究通过一次取样

初步分析了整个汾河流域地下水 NO_3^- 的分布状况, 但未分析造成污染的原因. 因此, 在未来工作中需要更全面地对该流域地下水 NO_3^- 的污染状况进行监测、评估及污染来源分析, 以期实现水资源的可持续管理.

3 结论

(1) 汾河流域地下水属弱碱性和微硬水; 优势阴阳离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ; 水化学类型以 Mg-Ca-HCO_3 和 Mg-Ca-Cl-SO_4 为主; 地下水水质整体较好, I ~ III 类水占比超 94%.

(2) 汾河流域地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -70.2‰ 和 -9.6‰ , 与 7 ~ 9 月降水同位素值相似, 指示地下水可能主要来源于该时期的降水, 并发现地下水补给方式(优势流和活塞流)存在一定的空间变化.

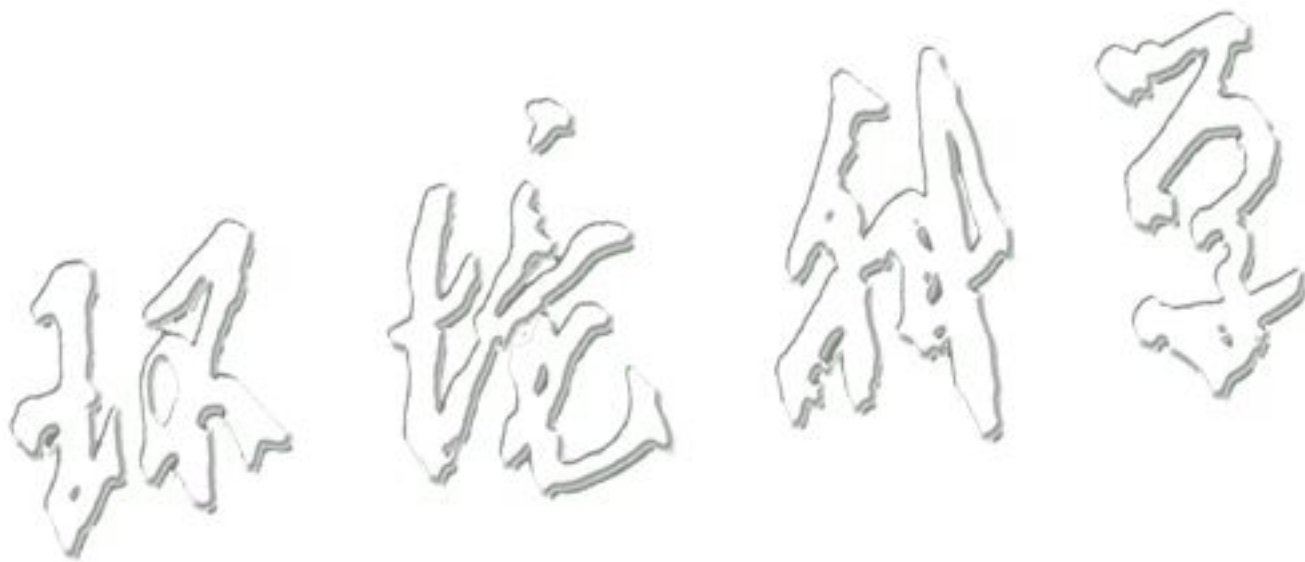
(3) 岩石风化是地下水溶质的主要来源(87%), 而大气输入和人类活动相对较小, 分别占 8% 和 5%. 在岩石风化中, 硅酸盐岩、蒸发盐岩和碳酸盐岩对地下水溶质的贡献相当, 分别占 32%、28% 和 26%.

参考文献:

- [1] 谢浩, 梁永平, 申豪勇, 等. 汾河流域地下水位下降原因及影响[J]. 中国矿业, 2020, **29**(S1): 587-589.
Xie H, Liang Y P, Shen H Y, *et al.* The causes and influence of groundwater level drop in Fenhe river basin[J]. China Mining Magazine, 2020, **29**(S1): 587-589.
- [2] Zhang X P, Zhang L, Zhao J, *et al.* Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Research, 2008, **44**(7): W00A07.
- [3] Gleeson T, Befus K M, Jasechko S, *et al.* Author correction: the global volume and distribution of modern groundwater[J]. Nature Geoscience, 2018, **11**(7): 542.
- [4] Al-khashman O A, Jaradat A Q. Assessment of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural uses in arid environment[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, **28**(3): 743-753.
- [5] 吴奇凡. 黄土高原陆地水储量变化归因分析及区域尺度地下水补给[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Wu Q F. Attribution analysis of terrestrial water storage and estimating groundwater recharge at regional scale on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [6] Xiao J, Wang L Q, Deng L, *et al.* Characteristics, sources, water quality and health risk assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2004-2012.
- [7] Xiao J, Jin Z D, Zhang F. Geochemical controls on fluoride concentrations in natural waters from the middle Loess Plateau, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **159**: 252-261.
- [8] Zhang Q Q, Jin Z D, Zhang F, *et al.* Seasonal variation in river water chemistry of the middle reaches of the Yellow River and its controlling factors[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **156**: 101-113.
- [9] Wu Q F, Si B C, He H L, *et al.* Determining regional-scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS[J]. Remote Sensing, 2019, **11**(2), doi: 10.3390/rs11020154.
- [10] Mohanty A K, Rao V V S G. Hydrogeochemical, seawater intrusion and oxygen isotope studies on a coastal region in the Puri District of Odisha, India[J]. CATENA, 2019, **172**: 558-571.
- [11] Xiang W, Si B C, Biswas A, *et al.* Quantifying dual recharge mechanisms in deep unsaturated zone of Chinese Loess Plateau using stable isotopes[J]. Geoderma, 2019, **337**: 773-781.
- [12] Li Z, Coles A E, Xiao J. Groundwater and streamflow sources in China's Loess Plateau on catchment scale[J]. CATENA, 2019, **181**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104075.
- [13] Wu J H, Li P Y, Qian H. Hydrochemical characterization of drinking groundwater with special reference to fluoride in an arid area of China and the control of aquifer leakage on its concentrations[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(12): 8575-8588.
- [14] Huang Y N, Chang Q R, Li Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **628-629**: 443-452.
- [15] Li Z, Xiao J, Evaristo J, *et al.* Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113006.
- [16] Li Z J, Yang Q C, Yang Y S, *et al.* Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. Journal of Hydrology, 2019, **576**: 685-697.
- [17] Zhao Y, Wang C L, Xiang W, *et al.* Evaluation of the hydrochemical evolution characteristics and renewable capacity of deep fresh groundwater in the Hangzhou Bay New Zone, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, **78**(22), doi: 10.1007/s12665-019-8645-x.
- [18] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3142-3149.
Kou Y C, Hua K, Li Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [19] 华琨. 黄土高原主要河流水化学和水质的时空特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Hua K. Spatiotemporal characteristics and controlling factors of water chemistry and water quality in the main rivers of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [20] 李洲, 李晨曦, 华琨, 等. 黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3559-3567.
Li Z, Li C X, Hua K, *et al.* Groundwater chemistry characteristics and the analysis of influence factors in the Luochuan Loess Tablelands[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3559-3567.
- [21] 刘皓雯, 秦伟, 高美荣, 等. 丘陵区典型小流域地下水化学特征与补给来源分析[J]. 山地学报, 2019, **37**(2): 186-197.
Liu H W, Qin W, Gao M R, *et al.* Chemical characteristics and recharging rates in the groundwater of typical small watersheds in the hilly central Sichuan basin, China[J]. Mountain Research, 2019, **37**(2): 186-197.

- [22] 祁斌. 汾河干流重金属迁移规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- Qi Y. Study on the heavy metal migration rule in the mainstream of Fenhe river[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [23] 侯新伟, 李向全, 陈浩. 汾河中游干流河水与大气降水和浅层地下水的转化关系[J]. 水文地质工程地质, 2008, **35**(6): 38-41.
- Hou X W, Li X Q, Chen H. Study on transforming relationship among surface water, precipitation and groundwater along Fenhe River in Taiyuan Basin [J]. Hydrogeology & engineering geology, 2008, **35**(6): 38-41.
- [24] 唐文秀. 汾河流域环境承载力的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- Tang W X. Study on water ecological carrying capacity of Fen river basin [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [25] 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 等. 汾河源区不同景观带水文过程研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2108-2113.
- Yang Y G, Li C M, Qin Z D, et al. Hydrologic processes of the different landscape zones in Fenhe River headwater catchment [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2108-2113.
- [26] 刘宇峰, 孙虎, 原志华. 1960 年至 2007 年汾河流域气温年际和季节性变化特征分析[J]. 资源科学, 2011, **33**(3): 489-496.
- Liu Y F, Sun H, Yuan Z H. Annual and seasonal change characteristics of temperature in the Fenhe river basin during the period 1960-2007[J]. Resources Science, 2011, **33**(3): 489-496.
- [27] Landwehr J M, Coplen T B. Line-conditioned excess: a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems[A]. In: Isotopes in Environmental Studies[C]. Vienna, Austria: IAEA, 2004.
- [28] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, et al. Examination of the ecohydrological separation hypothesis in a humid subtropical area: Comparison of three methods[J]. Journal of Hydrology, 2019, **571**: 642-650.
- [29] Qian J, Zheng H, Wang P F, et al. Assessing the ecohydrological separation hypothesis and seasonal variations in water use by *Ginkgo biloba* L. in a subtropical riparian area[J]. Journal of Hydrology, 2017, **553**: 486-500.
- [30] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, **25**(6): 914-928.
- [31] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang river basin [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [32] Nagaraju A, Balaji E, Sun L H, et al. Processes controlling groundwater chemistry from mulakalacheruvu area, chittoor district, andhra pradesh, south India: a statistical approach based on hydrochemistry[J]. Journal of the Geological Society of India, 2018, **91**(4): 425-430.
- [33] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process [J]. Science, 1970, **170**(3985): 870-872.
- [34] Charfi S, Zouari K, Feki S, et al. Study of variation in groundwater quality in a coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis[J]. Quaternary International, 2013, **302**: 199-209.
- [35] Li S Y, Lu X X, Bush R T. Chemical weathering and CO₂ consumption in the Lower Mekong River[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 162-177.
- [36] Xiao J, Zhang F, Jin Z D. Spatial characteristics and controlling factors of chemical weathering of loess in the dry season in the middle Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2016, **30**(25): 4855-4869.
- [37] Li S Y, Zhang Q F. Geochemistry of the upper Han River basin, China: 2: Seasonal variations in major ion compositions and contribution of precipitation chemistry to the dissolved load[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **170**(2-3): 605-611.
- [38] Rabeiy R E. Assessment and modeling of groundwater quality using WQI and GIS in Upper Egypt area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **25**(31): 30808-30817.
- [39] WHO. Guidelines for drinking-water quality: 4th edition, incorporating the 1st addendum [R]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2017.
- [40] Zhang Q Y, Xu P P, Qian H. Assessment of groundwater quality and human health risk (HHR) evaluation of nitrate in the central-western Guanzhong basin, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(21), doi: 10.3390/ijerph16214246.
- [41] 赵欣. 山西省人口分布与经济发展空间一致性研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018.
- Zhao X. Multi-scale studies on the space consistency between population distribution and economic development in Shanxi province[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2018.
- [42] Sun C J, Chen W, Chen Y N, et al. Stable isotopes of atmospheric precipitation and its environmental drivers in the Eastern Chinese Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2019, **581**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124404.
- [43] 程立平, 刘文兆, 李志, 等. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J]. 水科学进展, 2016, **27**(5): 670-678.
- Cheng L P, Liu W Z, Li Z, et al. Land use change affects groundwater recharge in the Changwu loess tableland of China [J]. Advances in Water Science, 2016, **27**(5): 670-678.
- [44] 凌新颖. 陇东黄土高原地下水补给与演化规律研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- Ling X Y. Study on groundwater recharge and hydrogeochemical evolution of the Loess Plateau in the east Gansu [D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2019.
- [45] 刘鑫. 基于氢氧同位素的黄土高原丘陵沟壑区浅层地下水补给机制研究: ——以岔巴沟流域为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2010.
- Liu X. Groundwater recharge mechanism in hilly loess regions of Loess Plateau using environmental isotopes-a case study in Chabagou catchment [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2010.
- [46] Huang T M, Ma B Q, Pang Z H, et al. How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers[J]. Journal of Hydrology, 2020, **583**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124532.
- [47] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, (13): 35-40.
- [48] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, **133**(3465): 1702-1703.
- [49] Lin H. Linking principles of soil formation and flow regimes[J]. Journal of Hydrology, 2010, **393**(1-2): 3-19.
- [50] Chen J S, Wang F Y, Meybeck M, et al. Spatial and temporal analysis of water chemistry records (1958-2000) in the Huanghe (Yellow River) basin[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**(3), doi: 10.1029/2004GB002325.

- [51] 罗进, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 赤水河中下游冬季河水化学空间分布特征分析[J]. 地球与环境, 2014, **42**(3): 297-305.
Luo J, An Y L, Wu Q X, *et al.* Spatial distribution of surface water chemical components in the middle and lower reaches of the Chishui river basin[J]. Earth and Environment, 2014, **42**(3): 297-305.
- [52] 华琨, 李洲, 李志. 黄土区长武塬地下水水化学特征及控制因素分析[J]. 环境化学, 2020, **39**(8): 2065-2073.
Hua K, Li Z, Li Z. The hydrochemical characteristics and controlling factors of groundwater in the Changwu loess tableland [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(8): 2065-2073.
- [53] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4981-4990.
Zhang T, He J, Li J J, *et al.* Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong river basin [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [54] Chen Y, Zhu S Y, Xiao S J. Discussion on controlling factors of hydrogeochemistry and hydraulic connections of groundwater in different mining districts[J]. Natural Hazards, 2019, **99**(2): 689-704.
- [55] Carol E S, Kruse E E, Laurencena P C, *et al.* Ionic exchange in groundwater hydrochemical evolution. Study case: the drainage basin of El Pescado creek (Buenos Aires province, Argentina) [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **65**(2): 421-428.
- [56] Xing M, Liu W G. Using dual isotopes to identify sources and transformations of nitrogen in water catchments with different land uses, Loess Plateau of China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(1): 388-401.
- [57] Meng Z, Yang Y G, Qin Z D, *et al.* Evaluating temporal and spatial variation in nitrogen sources along the lower reach of Fenhe River (Shanxi Province, China) using stable isotope and hydrochemical tracers [J]. Water, 2018, **10**(2), doi: 10.3390/w10020231.



CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)